



TITLE:

Integral Study of GaN Amplifiers and
Antenna Technique for High Power
Microwave Transmission(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Hasegawa, Naoki

CITATION:

Hasegawa, Naoki. Integral Study of GaN Amplifiers and Antenna Technique for High Power Microwave Transmission. 京都大学, 2018, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2018-03-26

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21108>

RIGHT:

京都大学	博士（工学）	氏名	長谷川 直輝
論文題目	Integral Study of GaN Amplifiers and Antenna Technique for High Power Microwave Transmission (大電力マイクロ波送電のための GaN 増幅器およびアンテナ技術の統合的検討)		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文では、大電力ビーム型マイクロ波送電におけるキーコンポーネントである GaN 増幅器およびアンテナ技術の統合的な検討についてまとめられている。特に、マイクロ波送電などの無変調連続波（CW: Continuous wave）を前提とした検討が行われた。具体的には、CW 条件における回路合成法を使った高出力 GaN 増幅器の設計・試作、アレーアンテナによる空間合成法のために必要な小型高効率 GaN 増幅器の設計及びアンテナとの効果的な一体化、アレーアンテナによる空間合成法とアクティブアンテナ技術をベースとした低サイドローブ化手法の提案という 3 つの課題に取り組んでいる。</p> <p>第一章は序論であり、本論文の研究背景として大電力マイクロ波送電のアプリケーションや本論文で使用した GaN HEMT デバイスの特徴、そして大電力マイクロ波送電システムの構成についてまとめられている。また、大電力マイクロ波送電の歴史を通して、従来のマイクロ波送電技術について紹介している。さらに、従来の送電システムの問題点を明らかにし、本論文での研究目的について述べている。特に、本論文ではワンポートの大開口アンテナおよびアレイアンテナシステムを想定したコンポーネントとして、大電力 GaN 増幅器、高効率 GaN 増幅器、アクティブアンテナについて紹介している。</p> <p>第二章では、大電力マイクロ波送電におけるキーコンポーネントである RF アンテナおよび GaN 増幅器について紹介している。特に、近年多く利用される S 帯 (2GHz-4GHz)、C 帯 (4GHz-8GHz)、X 帯 (8GHz-12GHz) での GaN 増幅器の報告事例について出力電力・効率の観点からまとめ、合成法による高出力化や E 級、F 級、高調波処理による高効率化の有効性について述べている。また、GaN 増幅器の基本構成および設計手順について AB 級の GaN 増幅器をベースに述べている。増幅器の設計ではロードプル解析をもとに、GaN HEMT の最適インピーダンスを明らかとし、その値をターゲットとして RF 回路を設計する。試作された GaN 増幅器の最大出力電力・最大電力負荷効率はそれぞれ、5.8GHz において 43.1dBm および 44.5% であった。次章以降の GaN 増幅器設計では上記手順に沿った設計が行われる。</p> <p>第三章では、CW を使用した大電力アップリンク衛星通信を想定した大出力 GaN 増幅器の設計施策について述べている。従来では、CW 条件において 100W を超える大出力 GaN 増幅器をワンチップで実装した場合、チップの発熱により大きな効率劣化が指摘されていた。本論文では、ラディアルコンバイナを用いた増幅器の合成法により各増幅器の発熱量を減らすことで、低ロスに増幅器を合成し高出力化を実現している。初めに、ワンチップの GaN HEMT を用いた 41.7dBm 出力の増幅器が試作された。GaN 増幅器を 20 合成した大出力増幅器の試作では最大 52.6dBm (179.8W) の RF 出力が確認された。20 合成により 10.9dB の電力増強が見られたが、これは理想的な増強値 (13dB) に対してコンバイナ・ディバイダの損失を差し引いた値と概ね一致しており、熱的な劣化なく合成されたことを示す結果が得られている。得られた結果により、本手法が CW 条件における高出力増幅器の設計手法として有効であることが示された。</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	長谷川 直輝
<p>第四章では、高効率 GaN 増幅器および効果的なアンテナとの一体化手法について述べられている。高効率増幅器の設計において高調波処理は有効な高効率化手法である。高効率化の原理では、高調波周波数での電流電圧位相差が 90° となるような GaN HEMT の負荷インピーダンスを与えることで高効率化が達成されることが述べられている。二次高調波に対して最適な負荷インピーダンスは GaN HEMT 非線形モデルに対するロードプル解析により明らかにされている。高調波処理回路の設計では、得られた最適インピーダンスをターゲットとして回路設計がなされた。高調波処理回路を実装しなかった場合の増幅器と比較したところ、2 次高調波の電流電圧位相差が -90° に近づくことにより、10.13 ポイントの基本波に対する高調波の割合が減少したことが確認された。また、実測値においても 11.57 ポイントの最大 PAE の改善が見られ、高調波処理による効率改善の有効性が確認された。試作された、高効率 GaN 増幅器の最大出力・PAE はそれぞれ 37.95dBm(6.24 W), 62.94%であった。次に、試作した高効率 GaN 増幅器をベースにアクティブアンテナが設計された。アンテナとの一体化において、アンテナインピーダンスが増幅器の効率に影響を与えることを明らかとし、30Ω のアンテナインピーダンスにおいて増幅器の PAE 劣化が抑えられることが確認された。また、アンテナの設計では増幅器回路の小型化とアンテナゲインの増強を両立するために、高誘電体基板と低誘電体基板を組み合わせた多層基板を採用している。これより、シングルアンテナゲイン 6.40dBi, アクティブアンテナゲイン 22.43dBi の実測値を得ている。また、アクティブアンテナの EIRP および一体化された GaN 増幅器の出力特性を評価し、劣化なく増幅器とアンテナが一体化されたことを確認している。これより、GaN 増幅器の高効率化設計、効果的なアンテナとの一体化手法が示された。</p> <p>第五章では GaN アクティブアレイアンテナをベースとした低サイドローブ化手法について述べられている。従来研究においては、回路的なアプローチによる低サイドローブ化がなされており、状況に応じたアレイアンテナエレメントの振幅制御が不可能であった。本論文では GaN 増幅器のドレイン電圧を制御することで各エレメントの振幅を制御し、チューナブルに低サイドローブ化可能な手法が提案された。使用した GaN 増幅器は前章で試作した高効率増幅器が採用された。試作した 4 並列の GaN 増幅器出力電力・位相のドレイン電圧特性を測定し、測定値を基にアンテナ放射パターンが計算され、ドレイン電圧に応じた低サイドローブ化が確認されている。また、比較法を用いた遠方界測定により、4.52dB の低サイドローブ化が実測により確認されている。これより、本論文は DC 電圧制御によりチューナブルな低サイドローブ化に成功し、その手法が示された。</p> <p>第六章は結論であり、本論文で得られた成果について要約されている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、大電力ビーム型マイクロ波送電におけるキーコンポーネントである GaN 増幅器およびアンテナ技術の統合的な検討についてまとめられている。特に、マイクロ波送電などの連続波 (CW: Continuous wave) を前提とした検討が行われた。具体的には、① CW 条件における回路合成法を使った高出力 GaN 増幅器の設計・試作、② アレーアンテナによる空間合成法のために必要な小型高効率 GaN 増幅器の設計及びアンテナとの効果的な一体化、③ アレーアンテナによる空間合成法とアクティブアンテナ技術をベースとした低サイドローブ化手法の提案という 3 つの課題に取り組んでいる。本論文で得られた成果を以下の通りである。

① 高出力 GaN 増幅器を設計し、導波管系のラディアルコンバイナで 20 合成(回路合成)することで、7.1GHz の周波数において 179.8W の RF 出力電力を得た。本成果は、1 素子大出力増幅器をベースとした 1 つの大開口系アンテナという大電力ビーム型マイクロ波送電につながる。

② より高度な大電力ビーム型マイクロ波送電のためには、小型高効率 GaN 増幅器を複数使い、アレーアンテナを構築して空間で電力合成を行うことが求められる。そこで高調波処理手法により、電力負荷効率 (PAE) が 60% を超える 5.8GHz GaN 増幅器を設計し、アンテナとの一体化を行った。また、GaN HEMT-アンテナ間のインピーダンス変成比を抑えた設計手法を提案し、従来研究に比べ、一体化における効率劣化の影響を大きく抑えたアクティブアンテナを実現した。

③ パワー増幅器の出力飽和電力レベルが DC ドレイン電圧により電氣的に制御可能な点に注目し、新規に増幅器の出力電力レベルによるチューナブルなビーム制御のアプローチを提案した。遠方界測定によるデモンストレーションにおいて 1 次元アレイアンテナの低サイドローブ化を確認した。

以上を要するに本論文は、規提案手法に基づいた GaN 増幅器およびアンテナの統合的な検討がなされており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 30 年 2 月 8 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降